

Применение алгоритмов вершина-краска и краска-вершина для модификации метода координационных колец при частотно-пространственном планировании системы спутниковой связи с зональным обслуживанием

К.А. Гениатулин, В.И. Носов

В настоящей статье проведено исследование различных модификаций методов частотно-пространственного планирования, основанных на методе координационных колец. Рассматривается система подвижной спутниковой связи, построенная на основе геостационарного спутникового ретранслятора, использующего цифровую антенную решётку с узкими лучами диаграммы направленности. Антенна построена на основе концентрической кольцевой антенной решётки. При построении оптимального частотно-территориального плана учитывается влияние помех от боковых лепестков диаграммы направленности всех лучей, работающих в совмещённом канале. Рассматривается адаптация частотного плана к количеству абонентских терминалов, находящихся в зоне обслуживания каждого из лучей.

Ключевые слова: системы спутниковой связи с зональным обслуживанием; размерность кластера; оптимальное частотно-территориальное планирование; метод координационных колец; концентрическая кольцевая антенная решётка; коэффициент переподписки; алгоритмы краска–вершина и вершина–краска.

1. Введение

В условиях ограниченных частотно-энергетических ресурсов в спутниковой связи вопросы их эффективного распределения приобретают большую актуальность.

В то же время, в современных системах спутниковой подвижной связи (СПСС) широкое применение находят системы с многолучевыми антеннами (МЛА), узкими лучами диаграммы направленности (ДН) и зональным обслуживанием. При их построении неизбежно возникают задачи оптимального частотно-пространственного планирования.

Многообразие систем спутниковой связи и используемых на них антенн не позволяет разработать универсальный метод присвоения частот. Ограниченность применения линейных методов частотного планирования заключается в необходимости идеализации территориального размещения лучей и в наличии требований к однородности радиосети. Реальные сети спутниковой подвижной связи имеют нерегулярную и неоднородную структуру из-за кривизны земной поверхности. В то же время при взгляде со спутника, т.е. в угловой спутниковой проекции, зона обслуживания имеет регулярную структуру. Это позволяет использовать гексагональную модель сети для построения сотовой структуры зон обслуживания и проводить в ней частотно-пространственное планирование (ЧПП). Одновременно при проведении ЧПП необходимо учитывать её неоднородность, в первую очередь, вызванную различной наклонной дальностью в каждом из лучей.

В данной статье рассматривается модификация приведённого в [1] метода координаци-

онных колец алгоритмами краска-вершина и вершина-краска. Также рассмотрен метод оптимизации ЧПП за счёт адаптации к количеству абонентских терминалов, находящихся в зоне обслуживания каждого из лучей.

2. Зона обслуживания СПСС

По методике Машбица Л.М. [2, 3] построена зона обслуживания спутникового ретранслятора (СР) в геоцентрической проекции (рис. 1а), выведенного на геостационарную орбиту 90° в.д. Многолучевая антенная решётка формирует 40 узких лучей, пересекающихся на уровне -3 дБ. Каждый из лучей имеет ширину ДН, равную 1° . Позиция 90° в.д. выбрана исходя из того, что дуга $80^\circ - 90^\circ$ в.д. оптимальна для формирования рабочей зоны, максимально охватывающей Россию. Соответствующая зона обслуживания в угловой спутниковой проекции приведена на рис. 1б.

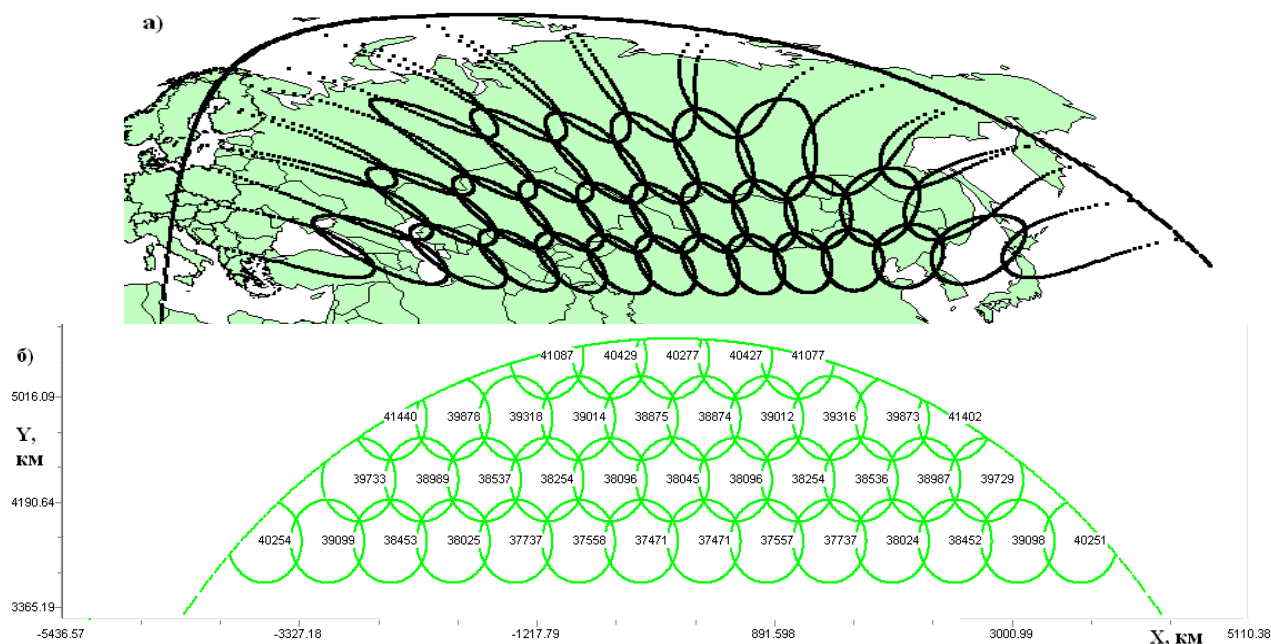


Рис. 1. Зона обслуживания СР, выведенного на геостационарную орбиту 90° в.д.
а) в географических координатах б) в угловой спутниковой проекции

Как видно на рис. 1б, гексагональная сеть спутниковой связи носит регулярную структуру. В то же время при проведении ЧПП необходимо учитывать её неоднородность, вызванную различной наклонной дальностью в каждом из лучей, которая может варьироваться от 37.4 до 40.4 тыс. км (на рис. 1б наклонная дальность d , км указана в центрах лучей).

3. Метод координационных колец, модифицированный алгоритмами краска-вершина и вершина-краска

В [1] рассмотрен метод координационных колец применительно к СПСС, использующей многолучевые антенны. При этом рассматривались назначения только части частотных каналов, количество которых соответствует размерности кластера $C_{кл}$. Остальные частотные каналы равномерно распределились для каждого луча в соответствии с выражением

$$f_k = f_0 + k \cdot C_{кл}, k = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где m – количество частотных каналов в луче.

Вместе с тем, одним из основных способов рационального использования радиочастотного спектра СПСС, особенно в случае неоднородной сети, является присвоение конкретных частот лучам СР вместо групп частот, в соответствии с частотно-пространственными огра-

нениями, обусловленными структурой ДН луча и требованиями к условиям помехозащищённости.

Суть задачи оптимизации частотного плана состоит в присвоении лучам АР частотных каналов, при котором минимизируется уровень взаимных помех в сети и размерность кластера.

Исходными данными для составления частотного плана являются ограничения на помехи по совмещённому и соседнему каналам приёма, представленные в виде минимально допустимых частотно-пространственных разностей лучей МЛА, нуждающихся в назначении частот. Прямой перебор возможных назначений частот как метод нахождения точного решения неприменим, т.к. требует реализации машинного времени, экспоненциально зависящего от размерности массивов. Единственным средством, позволяющим сравнительно быстро решать рассматриваемую задачу (при отсутствии гарантии получения строго оптимального плана), является эвристическая методика, в частности, базирующаяся на отождествлении центров зон обслуживания, формируемых лучами МЛА спутникового ретранслятора (СР), с вершиной графа взаимных влияний, а минимальных частотных разностей – с весами рёбер этого графа [4]. Отсутствие ребра в графе свидетельствует об отсутствии взаимных помех между соответствующими лучами. Задача присвоения частот сводится к задаче «раскраски» вершин графа $G = (V, E)$, когда связанным некоторым заданным образом вершинам (лучам) требуется приписать некоторый «цвет» (выделить канал).

Классическая задача раскраски графа заключается в следующем: присвоить вершинам графа минимально возможное число цветов из множества C так, чтобы смежные вершины были окрашены в разные цвета. Так как раскраска осуществляет разбиение множества V на n непересекающихся подмножеств V_i , то эта задача может быть сформулирована следующим образом. Для множества вершин V мощностью m ($|V| = m$) графа $G = (V, E)$ без петель найти такое присвоение, что

$$A : V \rightarrow C, \forall i, j = 1 \dots m, A(v_i) \neq A(v_j), e_{ij} \in E, n \rightarrow \min. \quad (2)$$

В отличие от классической, в рассматриваемой задаче присвоения, цвета (частоты) пар вершин, находящихся в смежных лучах, должны быть различными. В пределах одного луча ДН частоты не должны повторяться, а модуль их разности $|f(v_i) - f(v_j)|$ должен быть не менее определённой величины Δf , определяемой возможностью появления помех по соседним каналам приёма. В GMR-1 частотный разнос составляет $3\Delta f_k$ [5, 11].

Учтём также, что при назначении частот по условиям отсутствия помех по побочным каналам для некоторых подмножеств лучей $M_l \in M$ являются недопустимыми частоты, находящихся в соседних каналах приёма, описываемые функцией $\psi(V_l) = 0$.

Следовательно, задача присвоения частот является задачей раскраски взвешенного графа, в котором для некоторых подмножеств вершин V_l существуют запрещённые комбинации цветов. Она может быть сформулирована как обобщённая задача раскраски графа следующим образом.

Дано $G = (V, E)$ – взвешенный граф без петель с весами Δf_{ij} . Найти доставляющее минимум n присвоение, такое что

$$\psi(V_l) \neq 0, |A(v_i) - A(v_j)| \geq \Delta f_{ij} \quad \forall e_{ij} = \{v_i, v_j\} \in E. \quad (3)$$

Для получения одной из раскрасок пронумеруем каким-либо образом вершины графа и заданные цвета. Последовательно в порядке возрастания номеров вершин присвоим каждой из них допустимый цвет с минимально возможным на данном шаге номером. При правильной нумерации вершин и цветов полученная таким образом раскраска будет глобально-оптимальной в смысле минимизации числа использованных цветов. Критерием ранжирования вершин является степень сложности присвоения, которая связана с числом цветов $C = \{1, \dots, u\}$, любой из которых можно присвоить на данном шаге раскраски. Очевидно, на любом шаге [4]

$$\text{card}(C) \geq c_i \geq \text{card}(C - n_{i0} - n_{\text{пск}}), \quad (4)$$

где n_{i0} – число смежных с i вершиной вершин с фиксированными цветами;

$n_{\text{пск}}$ – число частот по соседним каналам приема, если i вершина входит в подмножество

V_l .

Анализ литературы [4, 6] показал, что наиболее применимыми эвристическими процедурами раскраски графа являются алгоритмы, основанные на многократном упорядочении вершин графа и множества цветов при исключении из множества V окрашенной очередной вершины. Принятая классификация таких алгоритмов разделяет их на два класса: «вершина–краска» и «краска–вершина». В первом случае сначала выбирается очередная из упорядоченного по какому-либо критерию списка вершина, а затем для неё выбирается первый из упорядоченного списка цвет. Далее данная процедура повторяется для оставшегося не окрашенным множества вершин графа до тех пор, пока их список не окажется пуст.

Во втором подходе фиксируется первый из упорядоченного по какому-либо критерию списка цвет, а затем выбираются те вершины, которым этот цвет допустим для присвоения. Вершины так же выбираются путём ранжирования их списка. После невозможности выбора очередной вершины для данного цвета, осуществляется поиск нового цвета путём упорядочивания списка неиспользованных цветов.

Считается, что удачный выбор критериев и правил ранжирования вершин и цветов, адекватных условиям раскраски и характеристикам графа сети СПСС, позволит получить близкие к оптимальным решения задачи.

Алгоритм содержит следующие основные операции [4]:

- формирование очереди лучей;
- выбор по определенному критерию частоты (канала) для очередного луча (из числа разрешённых для него частот (каналов));
- корректировка таблицы разрешённых частот для лучей, не имеющих частотного присвоения, которые оказываются для них запрещёнными вследствие присвоения канала очередной зоне обслуживания;
- переход к рассмотрению следующего луча.

Алгоритм выбора каналов и лучей, при использовании алгоритмов типа «вершина–краска» и «краска–вершина», включает следующие операции:

- определение множества зон лучей, с которыми рассматриваемый луч связан недопустимыми взаимными помехами;
- определение для каждого луча числа разрешённых для присвоения каналов;
- выбор по определенному критерию номера канала для очередного луча из списка разрешённых для него каналов, удовлетворяющего этому критерию (либо в случае алгоритма «краска–вершина» выбор луча для очередного канала из списка разрешённых для него лучей).

Обобщённый алгоритм оптимального частотного планирования СПСС с использованием предлагаемой методики представлен на рис. 2. Он включает в себя: подготовку исходных данных (координаты центров зон обслуживания лучей, характеристики ДН СР, эквивалентную изотропную излучаемую мощность (ЭИИМ) передатчика и коэффициент усиления антенны G , радиус зоны обслуживания R_z , определяемый раскрытием ДН луча по уровню половинной мощности); анализ ЭМС лучей; выбор очередного луча; поиск для него частотного присвоения. Это справедливо для алгоритмов типа «вершина–краска», а для алгоритмов типа «краска–вершина» действия 4 и 5 меняются местами.

Как видно из рис. 2, основными блоками любого из возможных алгоритмов являются действия 3, 4 и 5. Причём блок 3, анализ ЭМС лучей, является обязательным при использовании того или иного метода планирования. Этот блок определяет множество рёбер E графа сети и степени вершин.

Выбор очередного луча осуществляется на основе различных критериев, которые и были положены в основу разработанных алгоритмов. Были разработаны методы, условно названные А, В, С, D, Е, которые осуществляют упорядочение и выбор лучей. Основная суть этих алгоритмов заключается в следующем.

Алгоритм А – по порядку вершин. Лучи выбираются последовательно один за другим, начиная с первого и далее с увеличением порядкового номера луча, т.е. после присвоения

канала i -ому лучу, идёт присвоение $(i + 1)$ -ому лучу.

Алгоритм В – по минимуму частотных присвоений. В данном случае из множества лучей первым выбирается тот, который на текущем шаге имеет наименьшее число частотных присвоений, разрешённых по условиям ЭМС.

Алгоритм С – по минимуму частотных присвоений плюс максимальная степень вершины. В этом алгоритме, как и в алгоритме В, частотное присвоение первым получает луч, имеющий наименьшее число разрешённых по условиям ЭМС частотных присвоений. При равенстве этого показателя у нескольких претендентов учитывается степень вершины (число лучей, которое может оказать мешающее влияние на исследуемую зону обслуживания).

Алгоритм D – по максимальной степени вершины.

Алгоритм Е – по наибольшему числу требуемых частотных каналов.



Рис. 2. Частотное планирование сети СПСС с использованием алгоритмов вершина-краска и краска-вершина

Выбор оптимального частотного присвоения для определённого на предыдущем этапе решения луча производится из разрешенных каналов по условиям ЭМС. Для принятия решения о допустимости частотного присвоения в соответствии с условием $\gamma < KBB < \varepsilon$ производится расчёт KBB по формуле

$$KBB = 1 - \frac{\min(SINR_{ij}, SINR_{ji})}{SNR}, \quad (5)$$

где $SINR_{ij}$ – отношение сигнал/шум+помеха, которое установится в i -ом луче при назначении j -му лучу совмещённого канала;

SNR – отношение сигнал/шум в условиях отсутствия интерференционных помех.

Возможны два варианта выбора канала:

– с максимально допустимым уровнем помех (КВВ должно быть минимальным, но не менее γ);

– с минимальным уровнем поля помех (КВВ должно быть максимальным, но не более ε).

Данные варианты условно обозначены цифрами: 1 – первый случай, 2 – второй. Значения ε и γ задаются эмпирически. Таким образом, в данном модифицированном методе сохраняется идея метода координационных колец [4].

Были также разработаны алгоритмы, относящиеся к классу «краска–вершина». Они условно были названы F, G, H, I, J. В данных алгоритмах фиксируется очередной номер канала, начиная с первого, а затем выбираются все лучи, которые могут его использовать с допустимым уровнем взаимных помех, причём выбор очередного луча осуществляется описанными выше методами:

- алгоритм F по порядку выбора вершин соответствует алгоритму A;
- алгоритм G – алгоритму B;
- алгоритм H – алгоритму C;
- алгоритм I – алгоритму D;
- алгоритм J – алгоритму E.

Например, алгоритм A1 означает, что выбор лучей осуществляется по порядку, а назначение канала идёт по критерию с максимально допустимым уровнем помех. Аналогично, метод B2 означает, что первым получит частотное присвоение луч, имеющий минимальное число разрешённых для использования каналов, при этом выбирается канал с минимальным уровнем поля помех.

Для каждого луча задаётся матрица запрещённых для использования каналов и матрица полей. Первая матрица – строка длиной K_{Σ} (общее число каналов). Неравенство нулю i -го элемента означает невыполнение в этом канале условий ЭМС и о его запрещении для дальнейшего использования для рассматриваемого луча. Вторая матрица – строка, также имеющая размерность K_{Σ} , каждый элемент которой содержит уровень SINR при использовании для связи данной частоты в луче (SINR рассчитывается на границе зоны обслуживания).

На начальном этапе матрица запрещений заполняется нулевыми значениями, что означает разрешение на использование лучам всех возможных каналов. Матрица SINR первоначально (на этапе анализа ЭМС радиосредств) заполняется значениями сигнал/шум соответствующих диапазонов частот в условиях отсутствия интерференционных помех от других лучей.

Следующим этапом является выбор оптимального частотного присвоения. В начале для анализируемого луча проверяются матрица запрещений и матрица полей. Исходя из заданного критерия выбора канала (максимальный или минимальный допустимый уровень помех) и из значения КВВ и граничных параметров координационного кольца γ и ε осуществляется частотное присвоение.

После назначения частоты лучу, производится перерасчёт SINR у всех лучей для данного частотного канала и корректировка таблицы запрещений: помечаются каналы, которые оказываются для них запрещёнными вследствие присвоения канала анализируемому лучу. При этом учитываются ограничения на использование соседних каналов (требование к частотному разнесу $3\Delta f_k$), а также запрет на использование совмещённого канала в смежных лучах.

Расчёт SINR начинается с определения взаимного расположения центра зоны обслуживания полезного луча и центра зоны обслуживания мешающего луча. Полезным является анализируемый луч, а мешающими – все лучи, которым уже назначен текущий рассматриваемый частотный канал.

Расстояние между центрами зон обслуживания полезного и мешающего лучей определяется по их координатам следующим выражением

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (6)$$

где x и y – координаты центров зон обслуживания полезного i -го луча и мешающего j -го луча.

На основе полученного значения D_{ij} по методике, изложенной в [1], производится расчёт уровня SINR с учётом уровня помехи по боковым лепесткам от каждого мешающего луча. Определяется итоговый SINR для полезного луча. Далее рассчитывается КВВ и выполняется проверка: если $KBB \geq \varepsilon$, то между текущим полезным и мешающим лучом фиксируется би-направленное ребро и заполняется соответствующее поле в таблице запрещений.

Для алгоритмов С и D после каждого частотного присвоения также осуществляется расчёт степени вершины, которая представляет собой количество мешающих лучей для текущего присвоения, с учётом всех присвоенных данной вершине частотных каналов.

Аналогичная процедура проводится для всех остальных лучей. Последовательность описанных действий повторяется до тех пор, пока существует хотя бы один доступный для назначения частотный канал (см. рис 2).

4. Методика оценки эффективности выделения частотного ресурса

Для оценки эффективности выделения частотного ресурса в системе спутниковой связи разработана методика оценки пропускной способности СПСС при проведении ЧПП разработанными методами. Для этого получена зависимость суммарной скорости передачи данных в сети от значений SINR на входе приёмника антенны СР (линия вверх) и абонентского терминала (линия вниз), которые установятся в зонах обслуживания лучей МЛА.

В табл. 1 [7] приведены значения требуемых защитных отношений в зависимости от скорости кода FEC при модуляции $\pi/4$ QPSK. Для кодов с большими скоростями требуется большее защитное отношение A_3 .

Таблица 1. Защитные отношения для различных скоростей кода
(кодирование с прямой коррекцией ошибок, модуляция $\pi/4$ QPSK)

Скорость кода FEC, k/n	Требуемое защитное отношение A_3 , дБ при вероятности ошибки $p_{\text{ош}} = 10^{-3}$
1/2	1.00
3/5	2.23
2/3	3.10
3/4	4.03
4/5	4.68
5/6	5.18
8/9	6.20
9/10	6.42

Скорость передачи данных в частотном канале с учётом используемой сигнально-кодовой конструкции можно определить исходя из скорости кода по формуле

$$R_c = R(k/n), \text{ бит/с}, \quad (7)$$

где k/n – отношение числа информационных бит к общему количеству передаваемых бит;

R – скорость передачи в радиоканале, бит/с.

Например, для кода FEC 5/6 при скорости передачи в канале $R = 46.8$ Кбит/с, $R_c = 39$ Кбит/с.

С учётом (3.31) суммарная скорость передачи информации в сети определяется по формуле

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{c=0}^{F_i-1} \left[R \left(\frac{k}{n} \right)_{ci} \right], \text{ бит/с}, \quad (8)$$

где $(k/n)_{ci}$ – скорость кода с учётом SINR в c -ом канале, присвоенном i -му лучу;

M – количество лучей в СПСС;

F_i – количество доступных в i -м луче частотных каналов.

На рис. 3а и 3б приведены рассчитанные изменения скорости и SINR от ЭИИМ сигнала, излучаемого передатчиком абонентского терминала (рассматривается линия вверх).

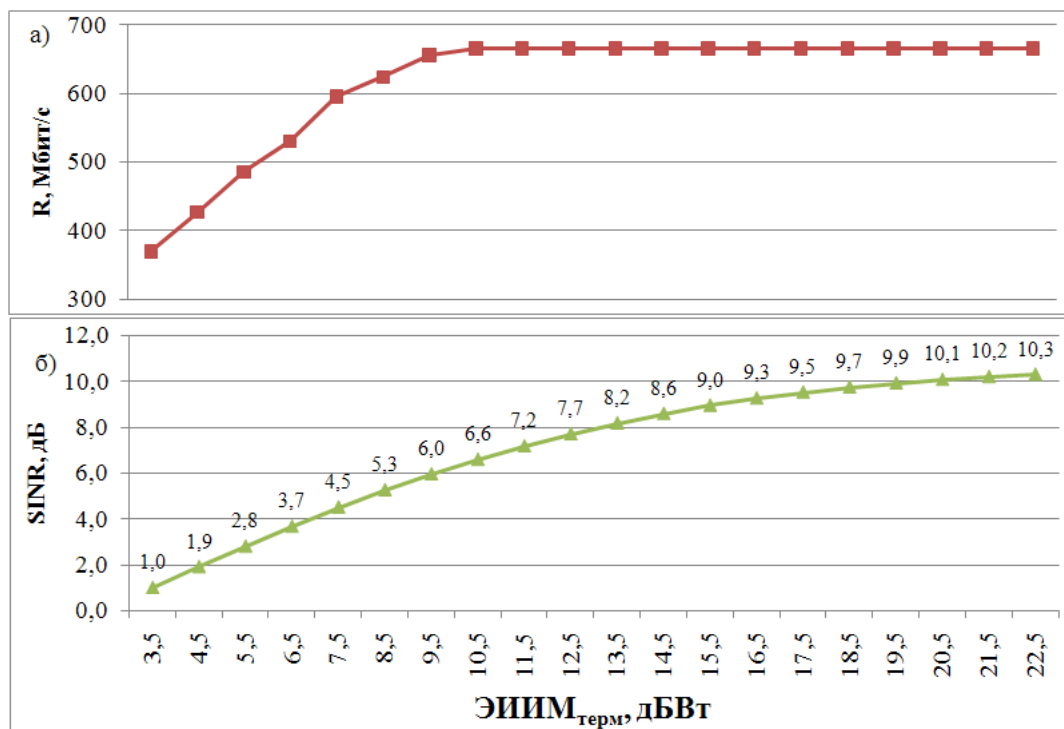


Рис. 3. Зависимость а) скорости от ЭИИМ_{терм} б) SINR от ЭИИМ_{терм}

Анализ приведённых зависимостей показывает, что при ЭИИМ_{терм} ≥ 10.5 дБВт наблюдается избыточность SINR, т.к. выбранная сигнально-кодовая конструкция имеет максимальную скорость передачи информации при FEC 9/10 и защитном отношении 6.42 дБ. Такой вывод позволяет сделать зависимость R от ЭИИМ_{терм} (рис. 3а). Значения R рассчитаны по формуле (8). Наглядно видно, что при ЭИИМ_{терм} ≥ 10.5 дБВт значение R остаётся неизменным, достигая максимального значения в 624 Мбит/с.

С помощью изложенной методики проведено сравнение эффективности различных модификаций МКК на линии вверх при различных значениях ЭИИМ_{терм}. Результаты исследования приведены на рис. 4. Моделирование проводилось при значениях параметров $\gamma = -2$, $\varepsilon = 0.5$, $A_3 = 5$ дБ.

Анализ приведённых графических зависимостей показывает, что модификации МКК A1, B1, F, G, H, I дают одинаковый с МКК1 (метод координационных колец, рассмотренный в [1]) результат по суммарной скорости передачи данных. Это подтверждает тот факт, что при равномерном распределении частотных каналов по сети (регулярная структура) суммарная пропускная способность сети достигает максимального значения.

Алгоритмы C1 и D1 привели к увеличению размерности кластера и незначительному уменьшению SINR в связи с нарушением регулярной структуры частотного плана.

Алгоритмы МКК A2, B2, C2 и D2 приводят к повышению SINR при одновременном увеличении размерности кластера. Это сказывается на снижении общей пропускной способности сети. Данный эффект обусловлен нижней границей $\gamma = -2$. Чем меньше её значение, тем больше увеличивается координационное расстояние между центрами зон обслуживания при назначении частот по критерию минимального поля помех.

Таким образом, в случае распределения всех частотных каналов по сети без учёта количества абонентских терминалов, требующих ресурса сети, МКК, модифицированный методами краска–вершина и вершина–краска не позволяет увеличить пропускную способность сети по сравнению с МКК1. Этот недостаток можно устранить, оптимизировав

методы ЧПП за счёт учёта распределения абонентских терминалов по зонам обслуживания лучей AP CP.

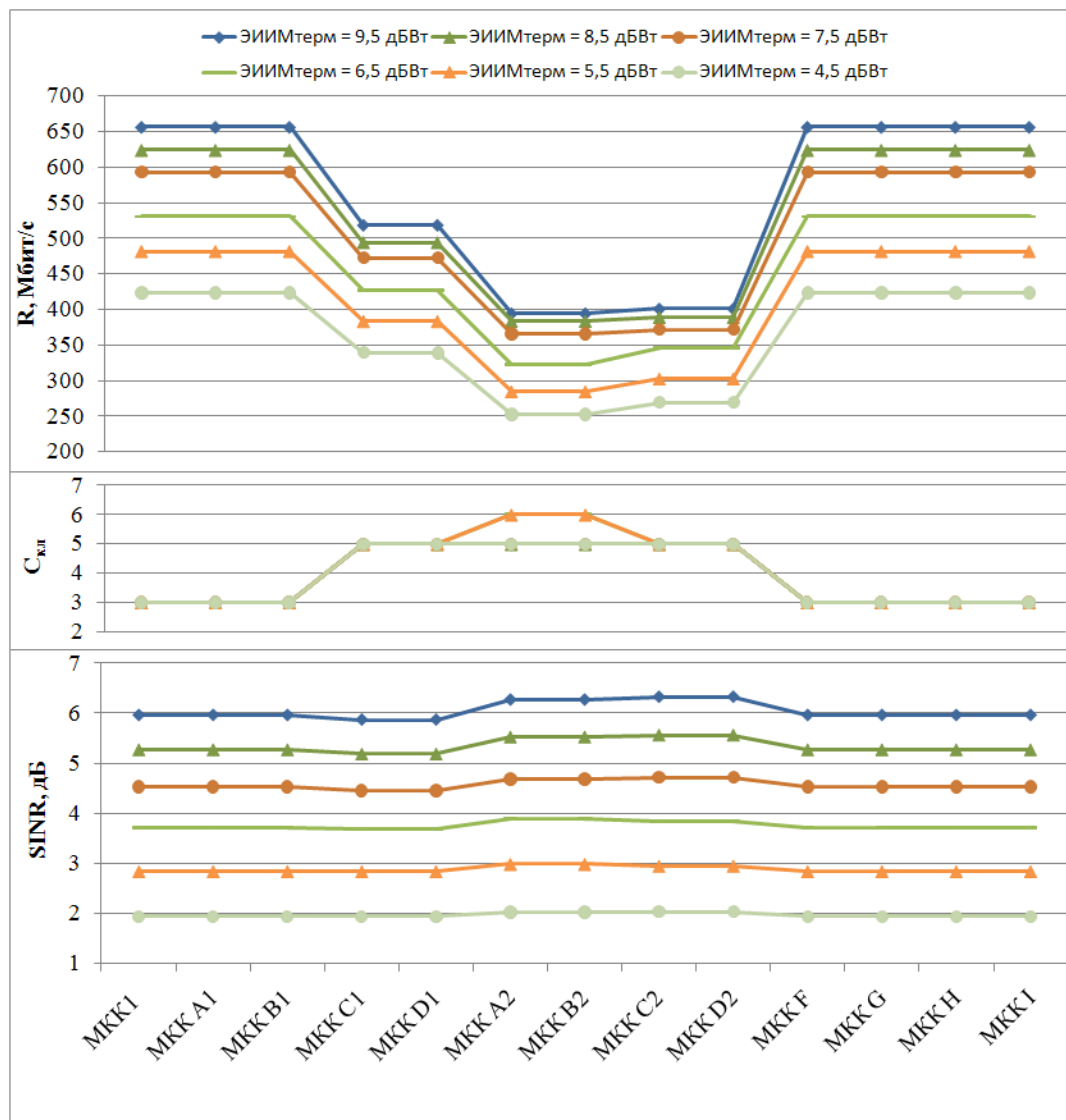


Рис. 4. Сравнение эффективности различных методов ЧТП

5. Метод повышения эффективности частотно-пространственного планирования, основанный на учёте перераспределения абонентов в лучах

С целью повышения эффективности использования частотно-временного ресурса СПСС целесообразно осуществлять перераспределение неиспользуемых частотных каналов в лучи с большей загрузкой.

Данный метод оптимизации ЧПП подразумевает адаптацию частотного плана к количеству пользовательских АТ, требующих частотный ресурс в единицу времени. Для решения этой задачи при ЧПП перед назначением частоты лучу должна выполняться проверка его текущей загрузки. Это позволит увеличить скорость передачи данных для абонентов сети, повысить помехоустойчивость каналов связи.

Для оценки степени загрузки лучей необходимо провести моделирование территориального распределения абонентских терминалов по зоне обслуживания сети.

Как правило, при проектировании СПСС задаётся допустимое число абонентов N_1 , кото-

рым могут быть предоставлены услуги связи. Однако очевидно, что в произвольный момент времени требовать доступа к ресурсу СР будет только часть абонентов (N_2). Для характеристики этого процесса используется *коэффициент переподписки* (overbooking factor) [8, 9].

Коэффициент переподписки определяет вероятность того, что абонент потребует согласованный с оператором ресурс в интервале времени Δt . Численное соотношение для коэффициента переподписки можно представить в виде

$$\xi = N_2 / N_1, \quad (9)$$

где N_2 – среднее число активных абонентов за время Δt . N_1 – общее количество зарегистрированных подписчиков.

Коэффициент переподписки можно оценить на основе статистических данных, полученных на большом отрезке времени наблюдения за активностью абонентов в сети. Допустим, что каждые сутки из общего числа зарегистрированных пользователей хотя бы раз частотный ресурс СПСС используют 65% [9]. Период наибольшей нагрузки на сеть будет составлять примерно 12 часов с примерно равномерным распределением в этом временном интервале. Таким образом, среднее число активных пользователей сети за любую минуту этого интервала составляет

$$N_2 = 0.65N_1 / 12 \cdot 60 = 9.028 \cdot 10^{-4} N_1. \quad (10)$$

Соответственно, по (9) и (10) можно определить усреднённое значение коэффициента переподписки для интервала $\Delta t = 1$ мин

$$\xi = N_2 / N_1 = 9.028 \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

Если допустить, что средняя длительность разговоров по мобильному каналу связи превышает 1 минуту, то, используя полученное значение (11) и выражение (8), мы можем оценить количество абонентов, находящихся на данный момент в сети.

Примем для расчётов значение $N_1 = 500000$, в соответствии с количеством абонентов, на которые рассчитывалась СПСС «Зеркало-Г1» [10]. Тогда в интервал $\Delta t = 1$ мин сеть должна будет обслужить примерно

$$N_2 = N_1 \cdot \xi = 500000 \cdot 9.028 \cdot 10^{-4} \approx 450 \text{ абонентов}. \quad (12)$$

Таким образом, средняя загрузка сети в интервал $\Delta t = 1$ будет составлять около 1 %.

Распределение абонентов по зоне обслуживания СПСС будем определять по равномерному закону, т.е. без учёта плотности населения и часовых поясов.

В качестве входного параметра задаётся максимально допустимое число абонентских терминалов в пределах зоны обслуживания одного луча N_{bmax} . На рис. 5 приведён пример распределения пользователей по сети при $N_{bmax} = 100$. Для моделирования использовалась разработанная средствами Visual C++ программная модель с применением встроенной функции rand, которая возвращает случайные числа по равномерному закону.

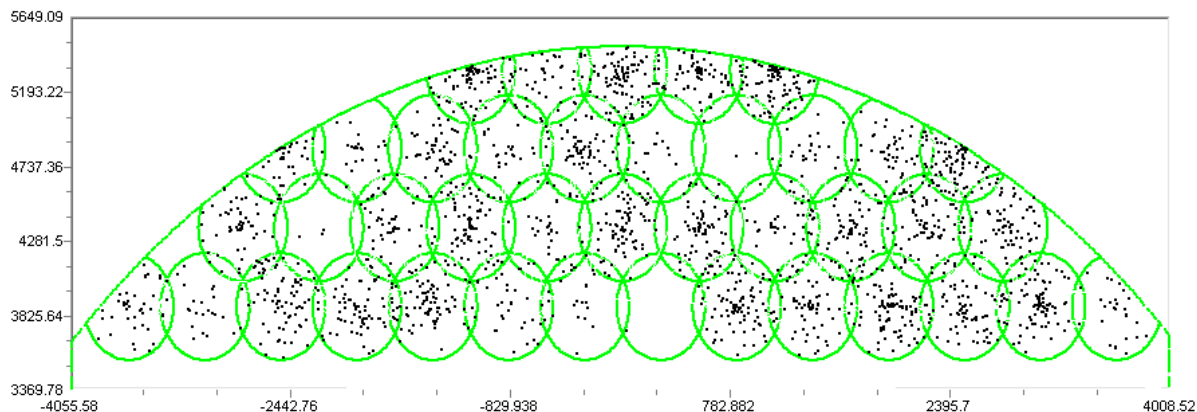


Рис. 5. Распределение абонентов внутри зоны обслуживания луча

Допустим, что в каждом луче СПСС одновременно требуют частотно-временной ресурс N_i абонентских терминалов ($i = 0, \dots, \text{card}(M)$).

Тогда при распределении частотных каналов в соответствии с разработанными методами ЧПП на каждый i -ый луч можно выделять такое количество частот, которое необходимо для обслуживания N_i абонентов. Т.к. для обеспечения связи 8 абонентам достаточно одного частотного канала, то требуемое число частот в луче можно рассчитать по формуле

$$K_{\max_i} = \text{int}[N_i / 8], \quad (13)$$

где $\text{int}[X]$ – целая часть числа X .

При распределении частот по методу МКК, модифицированного алгоритмами вершина-краска (краска–вершина) перед назначением лучу частотного канала выполняется проверка необходимости выделения ему частотного ресурса, т.е. условия $K_i < K_{\max_i}$. Если $K_i \geq K_{\max_i}$, то назначений частот в i -ом луче больше не производится. Благодаря этому высвободившиеся частоты, исходя из частотно-пространственных ограничений, могут быть назначены другим лучам.

Кроме того, модификации МКК E1, E2 и J осуществляют поиск очередной вершины по критерию $\max(N_i)$. Это позволяет назначать наиболее загруженным лучам системы частоты с более редкими присвоениями. Благодаря этому повышается SINR и обеспечивается более высокая скорость передачи данных.

Пример частотных присвоений по адаптивному методу координационных колец (рис. 6) наглядно демонстрирует, что частоты распределены по лучам сети неравномерно, в зависимости от числа пользователей в пределах их зон обслуживания. В данном примере размерность кластера $C_{\text{кл}} = 3$, количество частотных каналов $K = 12$, граничные параметры координационного кольца $\varepsilon = 0.5$, $\gamma = -2$, $A_3 = 5$ дБ.

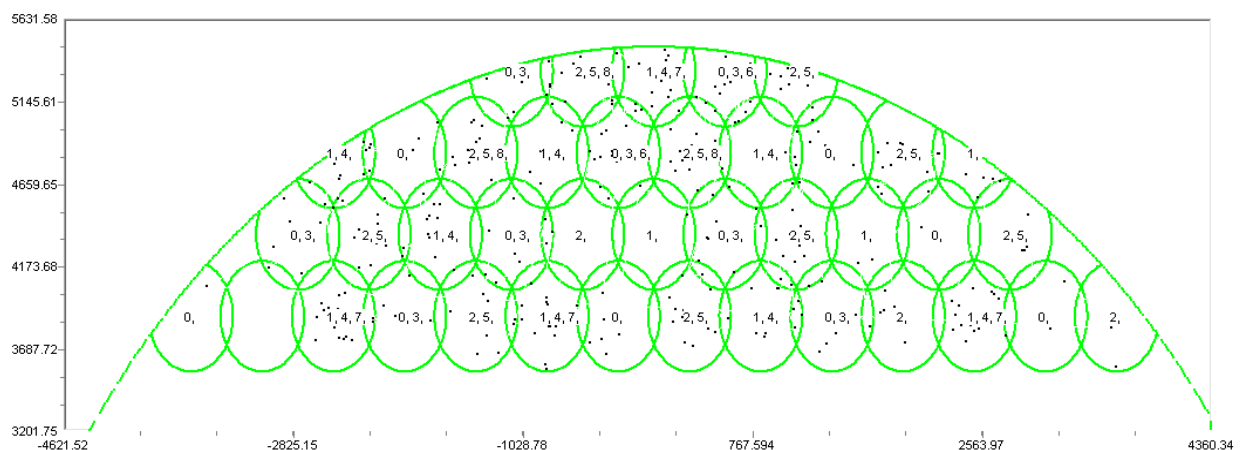


Рис. 6. Пример ЧПП с учётом распределения абонентов по сети

С помощью разработанной программной модели проведено ЧПП различными модификациями МКК на линии вверх при разных значениях ЭИИМ_{терм}. Результаты ЧПП приведены на рис. 7.

Анализ приведённых зависимостей показывает, что при ЭИИМ_{терм} = 8.5 дБВт и ниже адаптивный МКК, модифицированный алгоритмами вершина–краска и краска–вершина приводит к заметному увеличению суммарной скорости передачи данных в сети (приведена суммарная скорость загруженных частотных каналов).

Максимальное значение $R = 217.5$ Мбит/с получено при использовании МКК E2 (ранжирование вершин осуществляется по числу абонентов в луче, назначение частот – по минимуму поля помех). При этом $C_{\text{кл}} = 9$. Полученный выигрыш в скорости передачи данных составляет 13.1 Мбит/с (6.4%). Кроме того, полученное значение R превышает скорость передачи данных при ЭИИМ_{терм} = 9.5 дБ и ЧПП по МКК1, которая равна 215.1 Мбит/с.

При этом величина выигрыша в скорости будет зависеть от степени загруженности сети. При достижении предельного значения количества пользователей эффективность адаптивного МКК сравнивается с МКК1.

Таким образом, разработанные методы ЧПП позволяют эффективно распределить ча-

стотный ресурс по сети с учётом частотно-пространственных ограничений СПСС, влияния боковых лепестков ДН АР, множественности помех, неоднородности сети, а также распределения абонентских терминалов по зоне обслуживания сети.

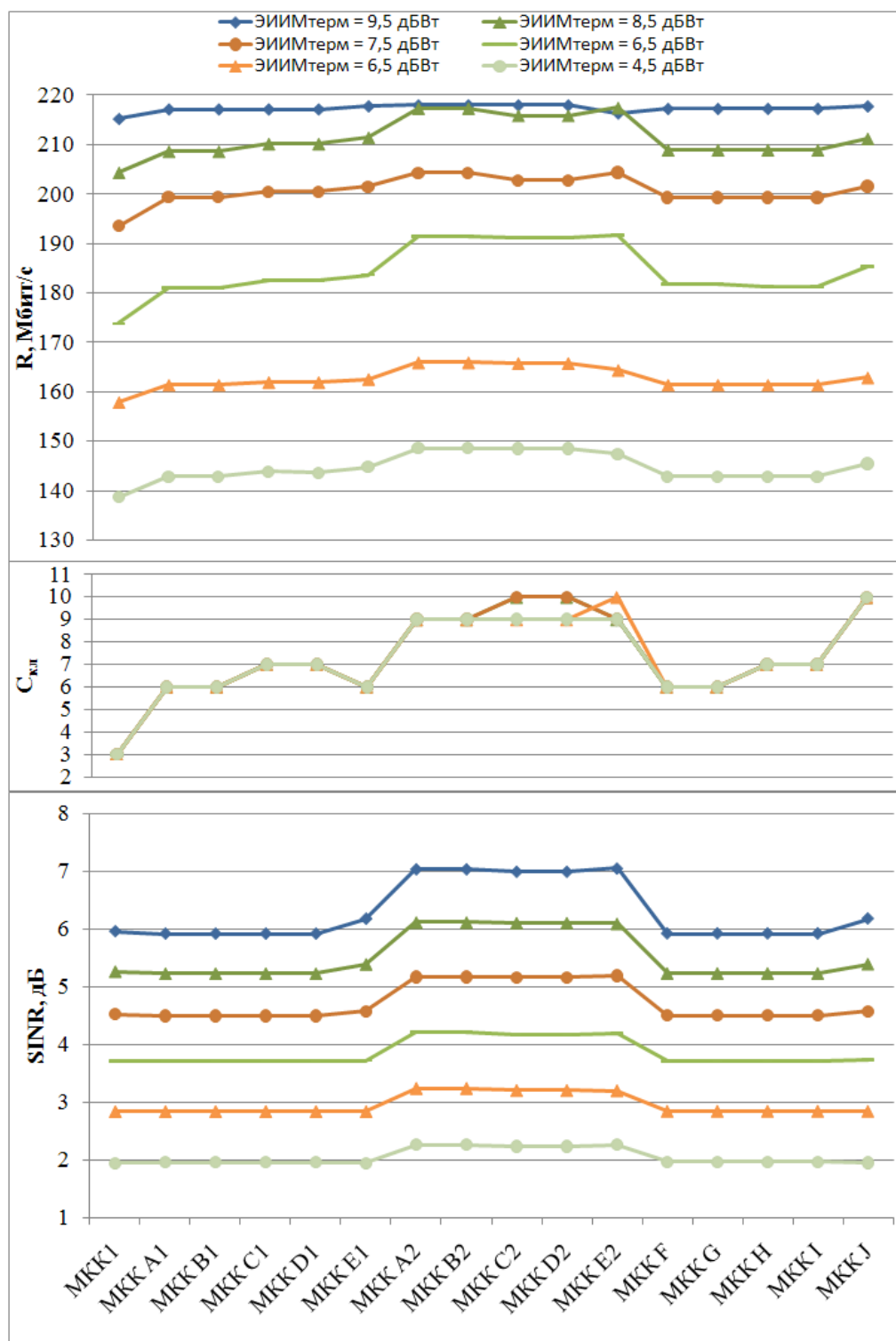


Рис. 7. Сравнение адаптивных методов ЧПП

При этом результаты исследований показали, что МКК1, а также МКК, модифицированный алгоритмами вершина–краска с назначением частот по максимуму поля помех и алгоритмами краска–вершина, наиболее эффективно действует в условиях большой загруженности сети, когда увеличение размерности кластера приводит к уменьшению пропускной способности сети.

При загрузке сети менее 90% наибольшую эффективность демонстрируют адаптивный

МКК, модифицированный алгоритмом вершина–краска с назначением частот по минимуму поля помех, который приводит к одновременному повышению скорости передачи данных в сети и увеличению размерности кластера. Степень его увеличения зависит от граничного параметра КВВ γ . В этой связи, при решении конкретной задачи планирования сети необходим экспериментальный поиск оптимального значения данного параметра.

Анализ результатов моделирования показывает, что при рассматриваемых характеристиках СР и сигнально-кодовых конструкций на линии вверх оптимальным является значение $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}} = 8.5$ дБВт. Увеличение мощности передаваемого сигнала приведет к избыточности в энергетике линии связи «вверх». $\text{ЭИИМ}_{\text{терм}} < 8.5$ дБВт приводит к ухудшению условий помехозащищённости и падению скорости передачи информационных данных.

6. Выводы

Таким образом, в данной статье разработан метод координационных колец, модифицированный алгоритмами вершина–краска и краска–вершина, позволяющий учитывать частотно-пространственные ограничения непосредственно при назначении каждого частотного канала в отдельности, а также неоднородность сети.

Разработана методика оценки эффективности выделения частотного ресурса на основе анализа суммарной скорости передачи данных в сети. На её основе проведён сравнительный анализ эффективности разработанных методов.

Предложен метод повышения эффективности ЧПП, основанный на учёте перераспределения абонентов в лучах. Для оценки его эффективности проведено моделирование распределения абонентов в лучах. На конкретном примере продемонстрирована эффективность ЧПП по методу координационных колец, модифицированному алгоритмами вершина–краска и краска–вершина с учётом загруженности лучей.

Литература

1. *Гениатулин К.А.* Применение метода координационных колец при частотно-территориальном планировании системы спутниковой связи с зональным обслуживанием / К. А. Гениатулин, В. И. Носов // Вестник СибГУТИ: научный журнал. – Новосибирск, 2014. – № 1 (25). – С. 35-48.
2. *Кантор Л.Я.* Спутниковая связь и вещание: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. / В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др.; Под ред. Л.Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.: ил.
3. *Машбиц Л.М.* Зоны обслуживания систем спутниковой связи / Л. М. Машбиц. – М.: Радио и связь, 1982. – 169с.
4. *Носов В. И.* Методы частотно-территориального планирования в сетях радиосвязи. Монография / В. И. Носов, Н. В. Носкова. – Новосибирск: СибГУТИ, 2006 г. – 162 с.
5. *Маковеева М.М.* Системы связи с подвижными объектами: Учеб. пособие для вузов / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.: ил.
6. *Быховский М.А.* Основы управления использованием радиочастотного спектра. т.3: Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использованием радиочастотного спектра. Монография. Издание осуществлено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-07-07021) / А. В. Васильев, В. И. Носов и др. Под ред. М.А. Быховского. – М.: КРАСАНД, 2012. – 368 с.
7. ETSI TR 102 376 v.1.1.1 (2005-02) Digital Video Broadcasting User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).
8. *Гениатулин К.А.* Моделирование распределения абонентов для проведения частотно-территориального планирования сети спутниковой связи с зональным обслуживанием / К. А. Гениатулин // Современные проблемы телекоммуникаций: мат-лы Росс. научн.-

- техн. конф. – Новосибирск: Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2014. – С. 103-104.
9. *Анпилогов В. Р.* Методика вероятностной оценки пропускной способности многолучевой спутниковой сети массового обслуживания / В. Р. Анпилогов, А. А. Афонин // «Электро-связь». – 2011. – № 7. – С. 45-47.
 10. *Невдяев Л. М.* Зеркало России [Электронный ресурс] / Л. М. Невдяев // Сети. – 2000. – № 9. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/nets/2000/09/141407/>
 11. ETSI TS 101 376-1-3 V3.1.1 (2009-07) Technical Specification GEO-Mobile Radio Interface Specifications (Release 3) Third Generation Satellite Packet Radio Service; Part 1: General specifications; Sub-part 3: General System Description GMR-1 3G 41.202.

Статья поступила в редакцию 01.07.2014

Гениатулин Константин Агзамович

аспирант СибГУТИ, офицер войсковой части 48840, тел. (383) 269-82-54,
e-mail: genkos@mail.ru

Носов Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем радиосвязи СибГУТИ, тел. (383) 269-82-54, e-mail: nvi@sibsutis.ru

Using of vertex-paint and paint-vertex algorithms to modify coordinating rings method in frequency-spatial planning of mobile satellite communication system with zonal maintenance

K. Geniatulin, V. Nosov

In this paper, different modifications of frequency-spatial planning methods based on the method of coordination rings are researched. Mobile satellite communication built on the basis of a geostationary satellite transponder using digital antenna array with narrow beams of radiation pattern is investigated. Concentric ring array is used for this purpose. The effects of interference from the side-lobe of all the rays working in co-channel are considered while constructing the optimal frequency-spatial plan. The adaptation of the frequency plan for the number of subscriber terminals requiring a frequency resource in a time unit is taken into account.

Keywords: satellite communication systems with zonal maintenance, frequency cluster, optimal frequency-spatial planning, coordinating rings method, concentric circular array, oversubscription ratio, vertex-paint and paint-vertex algorithms.